

소프트 스위칭 인버터의 새로운 회로구성과 그 성능 분석

김재혁, 한병문
명지대학교

New Circuit Configuration of Soft Switching Inverter and Its Performance Analysis

Jae Hyuk Kim, Byung Moon Han
Myongji University

ABSTRACT

본 논문에서는 3상 220V/5kVA 소프트스위칭 인버터의 새로운 회로구성을 제안하고 그 동작과 성능을 분석한 내용을 기술하고 있다. 제안하는 소프트스위칭 인버터는 ARCP(Auxiliary Resonant Commutated Pole) 인버터^[1]의 회로구성과 유사한 구조이나 이와 달리 LC 공진회로와 Diode 클램프 회로로 구성되어 있다. 이론적인 분석과 실험을 통해 제안하는 인버터의 효율을 분석하고 이를 하드스위칭 인버터와 비교하여 약 1% 정도의 효율 개선이 가능함을 알 수 있었다. 제안하는 인버터는 소프트 스위칭을 위해 소프트스위칭 보조회로와 게이트 드라이버가 추가로 장착되는 점에서 비용적인 경쟁력이 떨어질 수 있다. 그러나 최근 수요가 급증하고 있는 인버터에서 1% 효율 차이는 전력수급의 효율화를 통해 비용 측면에서 경쟁력을 갖을 것으로 판단된다. 또한 소프트스위칭 회로의 컴팩트화와 하드웨어의 최적화된 물리적 배치를 통해 추가의 효율증대가 가능할 것으로 보인다.

1. 서 론

최근 화석연료 고갈과 CO2 배출에 따른 환경 문제로 국내 외에서 풍력, 태양광, 연료전지 등과 같은 신재생에너지에 의한 발전과 전기자동차에 대해 많은 관심이 집중되고 있다. 신재생 에너지원에서 생산된 전력은 통상 인버터를 이용하여 상용 교류전력으로 변환된 후 소비자에게 공급되거나 또는 교류 전력망에 연계된다. 이와 같이 현재 많은 인버터가 신재생에너지 전력변환과 전기자동차 구동에 사용되고 있어 이들 인버터의 효율증대는 전기에너지 절감 측면에서 중요성을 갖는다.

2. 제안하는 소프트스위칭 인버터

그림 1은 본 연구에서 제안하는 소프트스위칭 인버터의 구성을 나타낸 것이다. 이 인버터의 보조회로는 두 개의 MOSFET 스위치 S_{X1} 과 S_{X2} , 두 개의 다이오드 D_{C1} 과 D_{C2} , 공진인덕터 L_r , 그리고 공진커패시터 C_r 로 구성되어 있다. ARCP의 보조회로와 차이점은 공진인덕터 L_r 앞단에 다이오드 D_{C1} 과 D_{C2} 로 구성된 클램핑 회로가 있고 주 스위치 양단에 연결된 공진커패시터 C_r 이 공진인덕터 L_r 에 대해 한쪽 방향으로만 연결되어 있다.

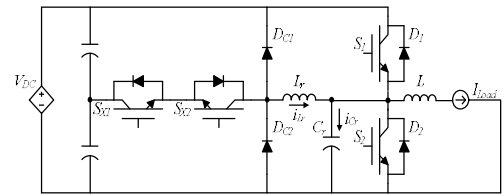


그림 1 제안하는 소프트스위칭 인버터

공진회로가 동작할 때 보조 스위치 양단에 Peak성 전압이 형성될 수 있으나 다이오드 클램핑 회로를 통해서 그 전압을 낮추어 스위칭 손실을 낮출 수 있고, 낮아진 전압을 통해 4상한 스위칭동작이 가능하고 스위치로 흐르는 양방향 전류를 저지 또는 도통시킬 수 있다. 또한 ARCP와 달리 별도의 공진커패시터 C_r 을 외부에 두어 공진인덕터 L_r 의 값을 작게 하여 소프트스위칭이 원활하도록 한다. S_{X1} 은 보조전류를 메인 인버터의 레그(leg)로 흘려주고, S_{X2} 는 인버터의 레그에서 나오는 전류를 중성점으로 흐르게 한다. 제안하는 인버터에서 스위치 S_1 이 Turn off에서 Turn on으로 전환되는 순간에는 ZVS로 동작하고 부하전류는 MOSFET으로 구성된 보조 스위치 S_{X1} 을 통하여 흐른다.

3. 동작모드 분석

그림 2는 제안하는 소프트스위칭 인버터의 스위칭 동작을 시간 축에 나타낸 것이다. 시간에 따른 구간을 분류하여 모드별 부연설명을 아래에 나타내었고 그림 3는 단상 소프트스위칭 인버터의 모드별 전류의 흐름을 나타내고 있다.

M1	CCM mode에 의한 전류 증폭이 충분할수록 공진인덕터 전류가 스위치 전류를 상쇄.
M2	$i_{Lr} > i_{Load}$ 이면 V_{Cr} 은 i_{Lr} i_{Load} 의 전류로 충전, S_2 의 V_{CE} 도 V_{Cr} 과 같은 전압으로 증가하며 S_1 의 V_{CE} 는 V_{DC} 에서 감소. S_1 의 V_{CE} 가 0V까지 하강하면 M3가 시작
M3	i_{Load} i_{Lr} 의 전류가 S_1 으로 흐르며 $i_{Lr} > i_{Load}$ 이면 S_1 의 Body diode를 도통(ZVS). i_{Lr} 은 선형적으로 감소하여 0A까지 하강하므로 i_{S1} 전류는 i_{Load} 까지 상승함
M4	$i_{S1} = i_{Load}$ 인 구간, 부하전류가 S_1 을 통해 도통
M5	i_{S1} 에는 부하전류와 부스팅된 전류가 같이 흐름
M6	S_1 이 Off되면 i_{Lr} 과 i_{Load} 의 합전류는 C_r 을 방전시키고 이로

인해 S_2 의 V_{CE} 는 V_{Cr} 과 동일한 전압으로 하강하며 S_1 의 V_{CE} 는 $V_{DC} - V_{Cr}$ 의 전압으로 상승. S_2 의 V_{CE} 파형은 C_r 에 의해 기울기가 발생하므로 S_1 의 V_{CE} 역시 상승시 기울기가 발생하여 i_{S1} 과 S_1 의 V_{CE} 가 오버랩 되는 시간을 줄여 스위칭 손실의 저감이 가능.

- M7 S_2 의 V_{CE} 가 0V까지 하강하면 i_{Load} 와 i_{Lr} 의 합전류가 Body diode를 통해 도통하고 i_{Lr} 은 0A까지 상승
- M8 $i_{S2} = i_{Load}$ 인 구간, 부하전류가 S_2 의 Body diode를 통해 흐름

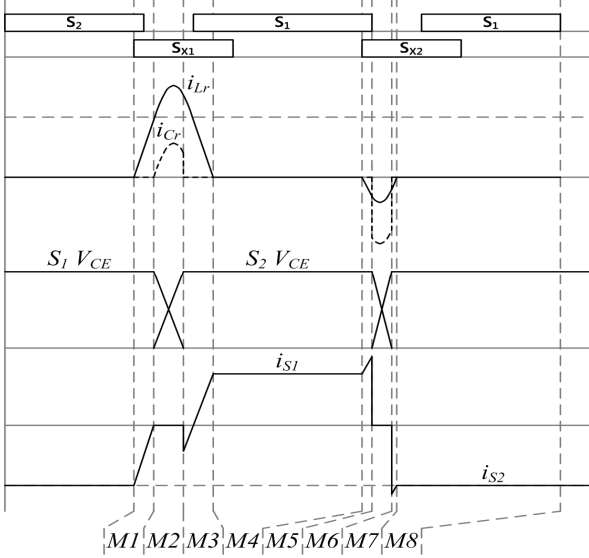


그림 2 제안하는 소프트스위칭 인버터

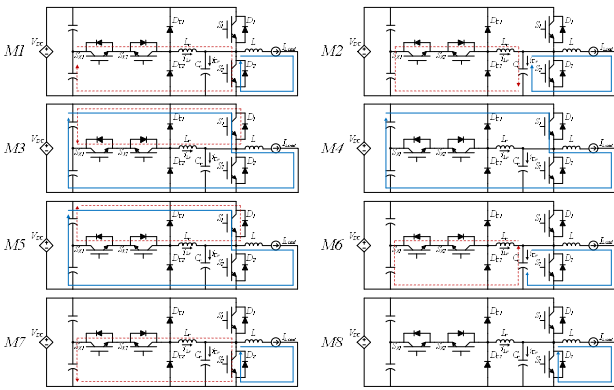


그림 3 제안하는 소프트스위칭 인버터의 모드별 전류흐름

4. 시뮬레이션 및 실험결과

제안하는 소프트스위칭 인버터의 동작을 분석하기 위해 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4는 5kW 부하에 따른 인버터의 소프트스위칭 동작을 확인하기 위해 주 스위칭 S_1 과 S_1 에 걸리는 전압과 공진전류를 나타낸 것이다. 출력전류가 증가함에 따라 스위치 S_1 의 펄스폭이 감소하고 공진전류가 증가함을 알 수 있다.

그림 5는 시뮬레이션을 토대로 하드웨어 실험을 수행한 결과 파형이다. 직류단 5kW의 부하를 두어 직류단 전압제어를 수행하였으며, 이때의 소프트스위칭 동작을 보여주고 있다. 앞서 확인했던 시뮬레이션과 동일한 하드스위칭 Duty와 공진 전류를 확인할 수 있다.

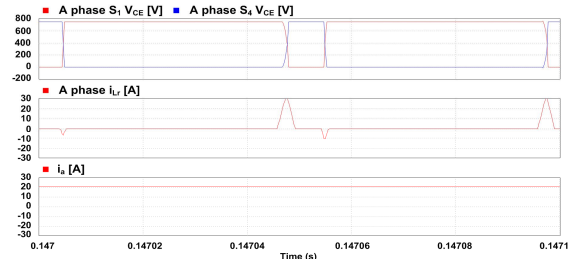


그림 4 출력전류에 따른 소프트스위칭 동작

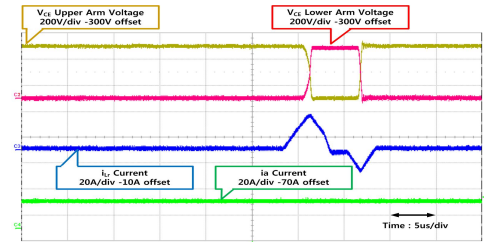


그림 5 소프트스위칭 동작 실험파형

하드스위칭 인버터와의 효율 비교분석을 위해 동일한 조건에서의 효율을 측정된 결과는 그림 6과 같다. 약 2kW 이하의 부하조건에서는 하드스위칭 인버터의 효율이 좋으나 2kW 이상의 부하조건에서는 소프트스위칭 인버터의 효율이 약 1% 이상 개선되었음을 알 수 있다.

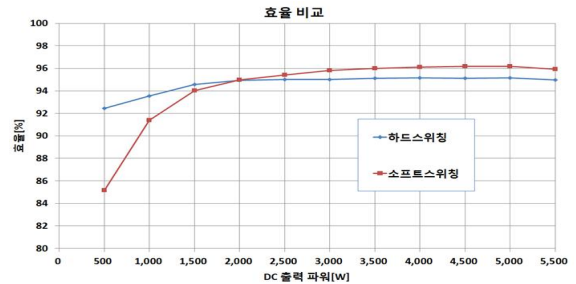


그림 6 효율 비교분석 시험 결과

3. 결론

본 논문에서는 ARCP 인버터에서 발생하는 보조스위치의 Ringing 현상을 완화할 목적으로 보조스위치, LC 공진회로와 Diode 클램프로 구성된 새로운 구조의 소프트스위칭 인버터를 제안하였다. 이론적인 분석과 실험을 통해 효율을 분석한 결과 제안하는 인버터는 하드스위칭 인버터와 비교하여 약 1% 정도의 효율 개선이 가능함을 알 수 있었다. 인버터 수요가 급증하고 있는 추세를 고려할 때 1% 효율 차이는 전체 전력수급 효율측면에서 충분한 경쟁력을 가질 것으로 판단된다.

이 논문은 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF 2015R1A2A2A01004102).

참고 문헌

[1] R. W. De Doncker, "The auxiliary resonant commutated pole converter," IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Seattle, USA, 1990, pp. 1228-1235 vol.2.